

粤东和越南沿岸上升流的分布特征及形成机制

学校编码：10384

学号：9927020

分类号_____密级_____

UDC _____

厦 门 大 学
硕 士 学 位 论 文

厦门海堤对厦门湾水动力影响的
数值实验

Numerical Experiment of the Impacts on the Hydrodynamic

Conditions of Xiamen Bay by the Xiamen Seawalls

陈 照 章

指导教师姓名：胡建宇 教 授

专 业 名 称：物理海洋学

论文提交日期：2004 年 8 月

论文答辩时间：2004 年 8 月

学位授予日期：

答辩委员会主席：陈金泉 教授

评 阅 人：曾焕彩 研究员

陈金泉 教授

2004 年 8 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

本文用数值模型计算了厦门海堤（含高集海堤、马銮海堤、集杏海堤）5种打开方案下的潮流场。

计算结果表明：五种方案情况下，各潮流场的空间分布和时间变化皆符合半封闭海湾理论上潮流场的规律。对现状（第一方案）的计算值与已有的实测相比较，符合程度较高。

文章指出了如下结论：

(1)高集海堤拆除情况下，西海域航道的流速将减小。

(2)在高集海堤不拆的情况下，海堤涵洞处潮流规律是：涨潮时流向自东北向西南，而且涵洞在围头角高潮时刻的流速大于围头角涨急时刻的流速；退潮时，涵洞处的流向自西南向东北，而且涵洞在围头角落急时刻的流速大于围头角低潮时刻的流速。

(3)如果拆除高集海堤，涨潮时从厦门岛东西两侧水域进入的潮流在高集断面以西相遇辐合，而退潮时由此位置分离辐散，从原“来路”退去。

(4)如果高集、马銮、集杏三海堤都拆除，在围头角涨急时刻，来自火烧屿附近海域的潮流在宝珠屿附近海域分成东、西两支，西分支进入马銮湾，东分支在高集断面以西与来自同安湾的潮流会合后进入杏林湾；在围头角高潮时刻，辐合线西移，来自同安湾的潮流分成东、西两支，东分支流入杏林湾，西分支与来自火烧屿水道的潮流会合进入马銮湾。在围头角落急时刻，杏林湾的海水向同安湾退去，而马銮湾的海水则向火烧屿水道退去；围头角低潮时刻，出杏林湾的海水分成东、西两支，东分支向同安湾退去，西分支与来自马銮湾的海水会合，朝火烧屿方向退去。

关键词： 厦门海堤；数值计算；潮流场

Abstract

Tidal current fields under five different opening schemes to the Gaoji Seawall, the Maluan Seawall and the Jixing Seawall are computed using a numerical model in this paper.

The numerical model results indicate that the spatial distributions and temporal distributions of the tidal current fields under five different opening schemes coincide with the regulations of the tidal current fields in the ideal semi-enclosed bay.

The paper concludes the following results:

(1) The tidal current speed in the western sea area will decrease if the Gaoji Seawall is open.

(2) In the case of the Gaoji Seawall remaining, the tidal currents at the hole of the Gaoji Seawall have the following features: The current direction is SW when flooding. The speed at the hole on the time Weitoujiao is at high water is greater than that on the time at flood. The current direction is NE when ebbing. The speed at the hole on the time Weitoujiao is at ebb is greater than that on the time at low water.

(3) If the Gaoji Seawall is open, the tidal currents from the eastern side and western side of the Xiamen Island will meet together on the western side of the Gaoji section when flooding, but the currents will separate there when ebbing.

(4) If the Gaoji Seawall, the Maluan Seawall and the Jixing Seawall are open at the same time, the tidal current fields near the seawalls have the following features: When the water is at flood, the tidal current from the Huoshaoyu will be divided into eastward branch and westward branch, so the westward one enters the Maluan Bay while the eastward one enters the Xinglin Bay after meeting with

the current from the Tong'an Bay on the western side of the Gaoji section. When the sea is at high water, the tidal current from the Tong'an Bay will be divided into two branches, so the eastward one enters the Xinglin Bay and the westward one enters the Maluan Bay together with the tidal current from the Huoshaoyu channel. When the water is at ebb, the water from the Xinglin Bay flows toward the Tong'an Bay while the water from the Maluan Bay toward the Huoshaoyu channel. When the sea is at low water, the water from the Xinglin Bay flows as two branches, so the eastward one flows into Tong'an Bay. The westward one flows into Huoshaoyu channel together with the water from the Maluan Bay.

Key Words: Xiamen Seawalls, Numerical model, Tidal current fields

目 录

中文摘要	-----	
英文摘要	-----	
第一章 前言	-----	1
1.1 研究的由来	-----	1
1.2 研究的方法与现状	-----	2
1.3 研究所要解决的问题	-----	3
第二章 模型的建立	-----	4
2.1 研究海域的地理和水文特征	-----	4
2.2 理论模型与数值模型	-----	5
2.3 理想半封闭矩形海湾潮流的数值模拟	-----	7
2.4 研究海域数值实验方案及相关参数	-----	8
第三章 五种方案条件下的数值计算	-----	16
3.1 方案一条件下的数值计算	-----	16
3.2 方案二条件下的数值计算	-----	25
3.3 方案三条件下的数值计算	-----	32
3.4 方案四条件下的数值计算	-----	39
3.5 方案五条件下的数值计算	-----	46
第四章 结论与讨论	-----	54
参考文献	-----	56
致谢	-----	58

Table of contents

Abstract(Chinese) -----	
Abstract(English) -----	
Chapter 1 Preface -----	1
1.1 Origin of the study-----	1
1.2 Method and present status of the study-----	2
1.3 Problems to be studied-----	3
Chapter 2 Establishment of the model -----	4
2.1 Geographical and hydrological characteristics in the studied area-----	4
2.2 Theoretical model and numerical model-----	5
2.3 Numerical calculation of the ideal semi-enclosed bay-----	7
2.4 Schemes and related parameters for the numerical experiments-----	8
Chapter 3 Numerical calculations of five schemes -----	16
3.1 Numerical calculation of the first scheme-----	16
3.2 Numerical calculation of the second scheme-----	25
3.3 Numerical calculation of the third scheme-----	32
3.4 Numerical calculation of the fourth scheme-----	39
3.5 Numerical calculation of the fifth scheme-----	46
Chapter 4 Conclusions and discussions -----	54
References -----	56
Acknowledgements -----	58

第一章 前言

1.1 研究的由来

厦门岛原本是个四面环海的岛屿，为解决公路、铁路交通问题，于 1955 年在岛的西北端高崎横跨海峡修筑了高集海堤连接于大陆的集美，将厦门西海域与同安湾相隔为二，只是在靠近高崎一侧留了一处宽约 13m 的涵洞供小船通行。高集海堤长 2212m，宽 19m，为国内首座花岗岩结构的跨海海堤^[1]。1956 年，在杏林湾口，修筑了集杏海堤将杏林湾和西海域完全隔离^[1,2]。

1960 年，为了围垦造地和解决盐业发展和交通问题，在西海域的马銮湾湾口修建了马銮海堤。马銮海堤长 1655m，高程 6m，堤顶宽度 8m。在海堤的北端和南端分别建造了 2 座排洪闸，使得湾内水体基本保持静止封闭，该海堤将马銮湾和西海域完全分隔。并且由于湾内围填加剧，马銮湾原有 22km² 的水面面积缩减到现在的 4.5km²。马銮海堤解决马銮湾防洪防潮、交通运输问题，但同时由于大量工业和生活污水排入以及失去了和西海域水体的自由交换，现湾内水体已严重污染、富营养化^[2-4]。

马銮海堤、集杏海堤与高集海堤并称为厦门海堤。这些海堤和随后的员当湖围填工程将西海域原 110km² 的面积缩小到现有的 52km²，缩小一半多^[1]，大大降低了纳潮量，对西海域水动力的变化产生了不可忽视的作用。

随着经济的发展，海洋环境在厦门经济中的作用日益显著，但与此同时航道淤积、赤潮、水质下降、海洋生态环境恶化等一些不利的海洋环境也逐渐显现。这些问题的出现一方面与工农业污染与生活污染排放量的增加有关系，另一方面也与水动力环境恶化，海水交换能力变弱有关。因此厦门对海洋环境日益重视，厦门市把城市发展定位为“国际港口风景城市”，加快实施建设海湾型城市的战略。为改善西海域水动力条件，进一步改善西海域水质，

近年来加大了对西海域的整治。其中对这些海堤的是否继续存在产生了各种看法，并围绕这一问题做了许多调查研究工作。其主要问题是海堤的拆除是否有利于附近海域的水动力的改善，进而是否有助于改善水体交换从而改善水质。如：有人认为扩大高集海堤过水断面或炸掉高集海堤可以改善西海域水动力，能冲刷西港航道并减少湾内淤积，并向市政府呼吁扩大高集海堤过水断面刻不容缓^[1]；也有人认为高集海堤切断了环厦门岛自然环流，并竭力建议厦门市政府拆除高集海堤恢复环流以冲刷航道^[5]。

基于对海堤存在与否的种种议论，有必要对这些假设可能引起的水动力改变的后果进行科学合理的揭示，从而避免盲目机械地下结论。本模型研究的出发点正出于此，通过建立二维垂直平均流模型，结合厦门全海域的地形水深资料，计算出这些海堤的开与合若干情形下的潮流场分布，分析出潮流场的变化，从而得出海堤拆除的利与弊，供相关部门决策时参考。

1.2 研究的方法与现状

研究海堤各种打开方案对厦门湾水动力的影响可以通过物理模型模拟、数学模型模拟等手段。

物理模型模拟遵循物理和几何的相似准则依照一定比例因子在实验室建立与研究海区相似的地形边界及水动力条件，通过对该物理模型各物理场的观测及该理想物理模型物理场变化规律和物理原型物理场变化规律的关系，从而可以反演出原型的物理场。该手段已广泛应用于河流、大坝以及与海洋相关的水流泥沙等方面的模拟，获得了良好的效果。缺点是投入的人力、财力巨大，动辄上百万、千万。

数学模型模拟实验是对理论上严格成立的海洋流体力学方程组，依据数值方法在满足相容性、稳定性及相应的初始条件和边界条件的基础上进行网

格有限差分或有限元计算，从而得出模拟时间和空间内的物理场分布变化规律。由于计算机的迅速发展，通过数值模拟节省了大量的人力、物力，从而得到了很好的应用。目前海洋动力数值模型模拟从简单一维潮波模拟发展到复杂的三维海洋及海洋和大气、河流的相互作用的各种过程动力、热力及生态动力学模拟^[7-8]。

目前对厦门海域的水动力研究，历史上进行过很多^[9-30]，积累了大量的资料，使用的手段包含了现场调查、物理模型模拟、数学模型模拟三种。现场调查的数据包含了潮汐、海流、波浪、泥沙等。近年来为了配合西海域整治工作的进行，厦门大学、国家海洋局第三海洋研究所、南京水利科学研究院、省航道局等相关单位对厦门海域进行了多次大面同步水文观测，针对各种问题建立了各种数学模型和物理模型进行模拟。这些研究虽然很多，但其主要是针对海堤存在的现状条件下的某个问题的模拟或模拟方法手段的研究，对于象本文诸海堤打开方案对水动力影响的研究却少见正式发表。

1.3 研究所要解决的问题

本模型针对高集海堤、集杏海堤、马銮海堤三个海堤存在与不存在 5 种组合方案进行厦门海域深度平均的二维半日潮流流场的数值计算。通过计算得出不同方案下潮流场的分布变化规律，并比较厦门西海域航道上若干个潮流特征点上的最大流速变化。

第二章 模型的建立

2.1 研究海域的地理和水文特征

厦门地区海域为众多海岛分布,主要岛屿为厦门岛以及鼓浪屿、金门岛、小金门岛、大嶝、大担、青屿等小岛屿,这些小岛屿的存在消减了传入厦门海湾内波浪的能量,使厦门湾成为避风良港。该海域西端有福建第二大河流—九龙江径流输入,北有被马銮海堤、集杏海堤分隔开的封闭的马銮湾和杏林湾,同时高集海堤将厦门西海域和同安湾分开。

厦门西部海域,北起厦门海堤,南以胡里山至青屿连线以西海域,包括厦门西港,九龙江口海域,厦门岛西南海域以及马銮湾、杏林湾,港湾面积达 230.14km^2 。在此海域深水岸线长,航道大部分水深 13m 以上,最大水深达 30m,深水泊位众多,是天然深水良港,水域平静,无拦门沙。码头年吞吐量上亿吨,其吞吐量居世界排名前 30 位。该海域潮流属半日潮流,并且呈往复流状态,表层潮流形态系数 $(W_{O1}+W_{K1})/W_{M2}$ 平均值为 0.34。潮流流速从湾口向湾顶减小,在某些狭窄水道流速较大。其海洋环境存在问题是航道出现淤积;生活污水、船舶排污、九龙江上游污水排放影响着该海域的水质,海水浴场水质受到污染。这部分海域主要肩负着港口航运功能,同时还有旅游、自然保护区的功能^[15-16]。

同安湾位于五通—澳头连线以北海域,西北端通过高集海堤与西海域相临。同安湾是个口小腹大的半封闭海湾,湾口宽约 3.5km,湾内面积 91.5km^2 。同安湾潮流形态系数 $(W_{O1}+W_{K1})/W_{M2}$ 平均值为 0.13,属半日潮流,但浅海效应较明显。余流分布为南岸流出,北岸流进的逆时针环流且流速较弱,不利于污染物排出,造成该海域水体交换能力差^[15-16]。

整个厦门海域潮波为台湾海峡传入的潮波,呈驻波性质;潮汐形态为正

规半日潮，根据厦门海洋站长年观测表明，该处的最大潮差 7.29m，最小潮差 3.2m，平均潮差 3.96m。湾口潮时分布不均，根据实测资料，湾口东北端围头角潮时比西南端的镇海角潮时早 20 分钟；落潮历时大于涨潮历时，多年平均涨潮历时 6 小时 18 分，多年平均落潮历时 6 小时 7 分；潮流分布呈往复流性质，以半日潮流为主^[16-17]。

2.2 理论模型与数值模型

2.2.1 理论模型

理论模型采用二维正压深度平均流动力模型，根据问题的需要及厦门海域特征尺度，不考虑气压水平变化、风应力及侧向摩擦，保留局部惯性项、平流项、水平压强梯度力、柯氏力、底摩擦。厦门海域潮波为外海传入的振荡潮，天体引潮力作用可忽略不计。

垂直平均流水动力方程如下：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + fv - ru\sqrt{u^2 + v^2} / H \text{-----}(1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - fu - rv\sqrt{u^2 + v^2} / H \text{-----}(2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial uH}{\partial x} + \frac{\partial vH}{\partial y} = 0 \text{-----}(3)$$

采用右旋直角坐标系，OXY 面与平均海平面重叠，Z 轴向上为正。 u 、 v 分别为 X 方向和 Y 方向的垂向平均流速； ζ 为相对于 OXY 面的水位， H 为瞬时水深， $H=h+\zeta$ ； h 为相对于 OXY 平面的水深绝对值； f 为柯氏参数； r 为底摩擦系数； g 为重力加速度。

初始条件为：

$$t=0 \text{ 时 } u=v=\zeta=0 \text{-----}(4)$$

边界条件为：

对于开边界水位, $\eta_{ob}=a\sin(\omega t)$ ----- (5)

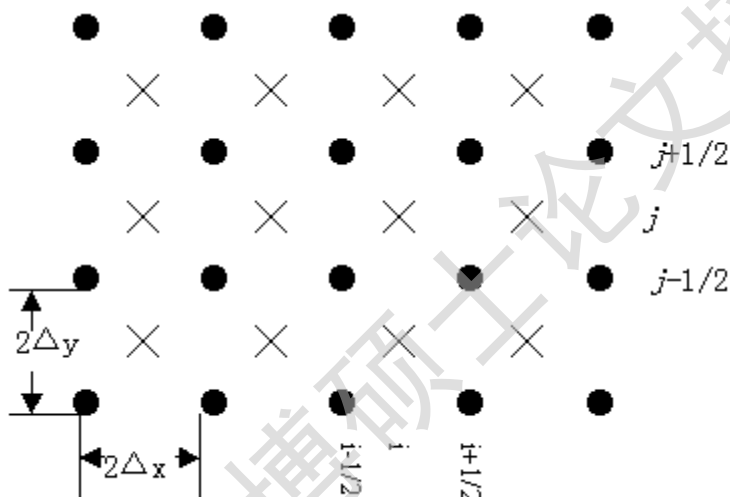
其中 a 为振幅, ω 为角速率。

对于固体边界, 取流速法向分量为零, $u_n=0$ ----- (6)

2.2.2 数值模型

2.2.2.1 差分网格及方程离散化

本模型采用直角坐标系下 B 型网格, 网格配置如下:



“•”为水位点; “X”为流点 u, v , 水深点 H, h ; $x = y = s_0$ 。

在此 B 型网格上进行方程的离散化, 可得到式(7)——(9)的差分方程。

$$\begin{aligned} & \frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n}{\Delta t} + u_{i,j}^n \frac{u_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n}{2\Delta s} + v_{i,j}^n \frac{u_{i,j+1}^n - u_{i,j-1}^n}{2\Delta s} = \\ & f v_{i,j}^n - g \frac{(\zeta_{i+1/2,j+1/2}^n + \zeta_{i+1/2,j-1/2}^n - \zeta_{i-1/2,j+1/2}^n - \zeta_{i-1/2,j-1/2}^n)}{4\Delta s} \\ & - r \sqrt{(u_{i,j}^n)^2 + (v_{i,j}^n)^2} u_{i,j}^n / H_{i,j}^n \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{v_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^n}{\Delta t} + u_{i,j}^n \frac{v_{i+1,j}^n - v_{i-1,j}^n}{2\Delta s} + v_{i,j}^n \frac{v_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n}{2\Delta s} = \\ & - f u_{i,j}^n - g \frac{(\zeta_{i+1/2,j+1/2}^n + \zeta_{i-1/2,j+1/2}^n - \zeta_{i+1/2,j-1/2}^n - \zeta_{i-1/2,j-1/2}^n)}{4\Delta s} \\ & - r \sqrt{(u_{i,j}^n)^2 + (v_{i,j}^n)^2} v_{i,j}^n / H_{i,j}^n \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\zeta_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} - \zeta_{i+1/2,j+1/2}^n}{\Delta t} + \frac{u_{i+1,j+1}^{n+1} H_{i+1,j+1}^n + u_{i+1,j}^{n+1} H_{i+1,j}^n - u_{i,j}^{n+1} H_{i,j}^n - u_{i,j+1}^{n+1} H_{i,j+1}^n}{4\Delta s} \\ & + \frac{v_{i+1,j+1}^{n+1} H_{i+1,j+1}^n + v_{i+1,j}^{n+1} H_{i+1,j}^n - v_{i,j}^{n+1} H_{i,j}^n - v_{i,j+1}^{n+1} H_{i,j+1}^n}{4\Delta s} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{其中 } H_{i,j}^n = h_{i,j} + (\zeta_{i+1/2,j+1/2}^n + \zeta_{i+1/2,j-1/2}^n + \zeta_{i-1/2,j+1/2}^n + \zeta_{i-1/2,j-1/2}^n) / 4 \quad (10)$$

2.2.2.2 网格步长、时间步长及稳定性条件

网格步长 s 、时间步长 t 符合差分方程 CFL 条件^[8],

$$\Delta t \leq \frac{2\Delta s}{\sqrt{2gH_{\max}}} \quad (11)$$

其中 H_{\max} 为最大水深。

2.3 理想半封闭矩形海湾潮流的数值模拟

假定一半封闭矩形海湾，长 40000m，宽 20000m，水深 20m，右端湾口为

一振幅为 2m、周期为 12 小时 24 分的正弦波强迫振动。

取 $\Delta x = \Delta y = \Delta s = 500m$, $\Delta t = 30s$, 可满足 CFL 条件。

依差分方程及初始、边界条件对该海湾进行数值模拟, 当计算达到稳定后, 得出涨急时刻、落急时刻、高潮时刻、低潮时刻四种状态下的流场图(图 2.3.1-2.3.4)。

模拟结果表明各时刻的潮流场符合半封闭海湾的潮流特征^[6]: 涨潮时, 潮流向湾内, 落潮时潮流向湾口; 高、低潮时全海湾流速达最小, 半潮面时全海湾流速达最大; 各个时刻, 湾口流速最大, 湾口到湾顶流速逐渐变小, 湾顶流速最小。

2.4 研究海域数值实验方案及相关参数

2.4.1 计算海域

本研究计算海域为围头角连接镇海角以西的金门和厦门海域(见图 2.4.1), 所计算海域长约 80km, 宽约 36km, 涵盖了环金门岛海域、环厦门岛海域、马銮湾、杏林湾及九龙江口。

2.4.2 计算海域水深、边界文件的形成

为计算方便, 将围头角和镇海角连线的开边界取为 X 轴, 并与 N 方向成 61° 夹角。通过对相关海图的数字化处理得到了计算海区的水深文件和边界文件, 并经坐标轴旋转计算将海图坐标转换到新的直角坐标, 得到了在本计算坐标系下的水深和边界文件。然后通过 SURFER 软件网格化插值计算, 并取网格步长为 81m, 计算网格点阵为 1000×472 , 这样很方便地通过 SURFER 软件插值得出所有计算点上的水深数据。这些水深是海图水深, 海图水深为理论最低低潮面起算的深度, 最后还需加上 3.3m 才是计算所需的厦门平均海平面起算的深度。计算海域的水深分布如图 2.4.2 所示。

2.4.3 数值实验方案

计算依各海堤的打开组合方式，选择其中五种方案(见表 2.4.1)分别进行数值计算。

为研究各种海堤打开方案对航道流速带来的影响，在西海域主航道敏感地带设立了 6 个潮流特征点，研究不同方案下最大涨潮流速和最大落潮流速的变化。6 个流速点分别设在宝珠屿海域航道、火烧屿东部水道、火烧屿南侧航道、嵩鼓水道、厦鼓水道、九龙江口鼓浪屿南侧海域(位置见图 2.4.3)。

表 2.4.1：海堤打开的 5 种方案

方案	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
高集海堤	存在	不存在	存在	存在	不存在
马銮海堤	存在	存在	不存在	不存在	不存在
集杏海堤	存在	存在	存在	不存在	不存在

2.4.4 计算参数及边界处理

网格步长： $x= y= s=81m$ ；

时间步长： $t=6$ 秒；

底摩擦系数： $r=0.005$ 。

围头角—镇海角开边界条件：由于计算海域属正规半日潮海区，因此本数值实验仅考虑 M_2 分潮。根据实测资料，围头角比镇海角潮时早 20 分钟。

相应地，在镇海角—围头角各水位点的迟角，以两地潮时差依(12)式进行线性内插，由此得到围头角—镇海角水边界条件的水位：

$$\zeta_{ob}(t) = 1.98 \sin(\omega(t - \varphi_i)) \text{-----}(12)$$

其中： $\omega = 2\pi / (12.4 * 3600)$ ； $\varphi_i = (1 - (i - 280) / 674) * 1200$

由于该边界上平均潮差为 3.96m，取其一半作为半日潮振幅(1.98m)；而 i 为开边界上水位点的 X 方向网格序号，镇海角序号为 280，围头序号为 854，所以两者差为 674。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库